

상호연계된 전력계통에 대한 상태추정기법의 개발

김 홍 래
순천향대학교 전기공학과

State Estimation for Interconnected Electric Power Systems

Kim, Hongrae
Dept. of Electrical Engineering, SoonChunHyang University

Abstract - This paper addresses the issues of the external system modeling and power system state estimation with the external model. A set of significant measurements is identified in the external system based on their sensitivities on the tie-lines. These measurement data are transferred to internal system and updated in real-time. The state estimator is run for different loading conditions by using the actual values for the internal system and selected significant external system measurements while keeping the rest of the external system measurements at their base case values. Simulation results are presented using the IEEE 118 bus system as an example.

1. 서 론

현대의 대형화된 전력계통은 인접한 전력계통들과 서로 연계되어 운용되고 있다. 서로 연계된 전력계통은 편의상 둘로 나뉘어지는데, 하나는 내부계통(internal system)이라고 불리는 현재自社가 운용하는 계통이고, 다른 하나는 他社들이 운용하는 외부계통(external system)이다. 내부계통과 외부계통은 연결선로들(tie-lines)에 의해 연계되어 있으며, 외부계통은 이 연결선로들을 흐르는 유·무효전력에 의해 내부계통에 영향을 주게 된다. 따라서, 내부계통을 효율적으로 감시하고, 안전하게 운용하기 위해서는 인접한 전력계통의 운용상태에 대한 정보가 반드시 필요하다.

우리나라의 경우, 한국전력이 전국의 전력계통을 일괄 운용하고 있으며, 주변국가들의 전력계통에 대해 고립되어 있는 계통의 특성때문에 외부계통에 관한 연구가 미진한 상황이다. 그러나, 세계적으로 전력공급의 민영화가 진행되는 추세이며, 인접국가 간의 전력유통제도(Electricity Sharing System)와 같은 지역 에너지협력체제가 확대될 가능성이 있으므로[1], 장기적으로 볼 때 북한이나 기타 인접국과

의 계통연계가 가능해질 경우에 대비하여 외부계통에 대한 연구의 필요가 대두되고 있다.

실제 계통을 운용할 때, 외부계통의 토폴로지(topology) 정보나 여러가지 측정데이터를 실시간에 이용하기는 사실상 불가능하며, 이러한 이유로 외부계통을 모델링하여 내부계통을 운용하는데 사용하려는 연구가 꾸준히 이루어져 왔다. 그러나, 이들은 대부분 조류계산을 위한 등가모델이나 온라인 안전도해석(on-line security analysis), 상정사고해석(contingency analysis)을 위한 것이었고[2-5], 상태추정을 목적으로 한 것은 아니었다.

80년대 중반 이후부터 데이터통신망을 통해 전력회사 간에 데이터를 실시간으로 교환하려는 시도가 미국에서부터 시작되었고[6,7], 이에 따라 내부계통의 상태추정에 외부계통으로부터의 데이터를 이용하려는 연구가 활성화되어 왔다. 그러나, 전력회사간 데이터 교환기구(inter-utility data exchange scheme)가 구현되더라도 외부계통 내의 모든 측정데이터를 실시간에 이용할 수는 없으며, 따라서 내부계통에 크게 영향을 미치는 외부계통 내의 주요 설비를 결정하고 이에 대한 모델을 개발하는 것이 여전히 필요하다.

본 논문에서는 상태추정을 위한 새로운 외부계통 모델을 제안하고, 현재의 상태추정 기법을 외부계통으로 까지 확장하여 좀 더 효율적이고 안전한 계통 운용을 할 수 있는 토대를 마련하려 한다.

2. 본 론

2.1 외부계통 모델

전력회사간에 필요한 데이터를 실시간 교환하려는 시도가 활성화되고 있기는 하지만, 각 회사들이 필요로 하는 모든 외부계통 데이터를 실시간 교환하는 것은 현실적으로 어려움이 따른다. 따라서, 내부계통의 운용에 필수적인 외부계통 데이터를 결정하고, 이 데이터들만이라도 실시간에 전송받아 사용하는 것이 필요하다. 이러한 중요한 외부계통 데이터들의 변화는 tie line들의 전력조류에 변화를 주

게 되고, 따라서 내부계통의 운용에도 영향을 끼치게 된다.

반면, 내부계통의 운용의 관점에서 볼 때 tie line의 전력조류에 많은 변화를 일으키지 않는 다른 외부계통 데이터들은 별로 중요하지 않다고 할 수 있다. 이러한 데이터들은 내부계통에 큰 영향을 끼치지 않으므로 내부계통으로의 실시간 전송의 필요가 적으며, 따라서 이 데이터들은 상태추정을 수행하는 과정에서 그 설계 기준값에 고정되게 된다.

본 논문에서는 감도해석(sensitivity analysis) 방법을 사용하여 내부계통의 운용에 영향을 미치는 외부계통 내의 주요 측정데이터를 결정하고, 이러한 측정값들을 실시간으로 전송받아 전체 계통의 상태추정에 이용하는 방법을 사용한다.

2.2 감도해석

외부계통 내의 주요 데이터를 결정하기 위해서 그림 1과 같이 서로 연계된 전력계통을 가정해보자. 그림에서 내부계통과 외부계통은 tie line에 의해 연결되어 있으며, 경계모선은 외부계통 내의 모선 중에서 tie line에 연결되어 있는 모선으로 정의한다. 감도해석을 위하여 경계모선과 tie line의 사이에 영 임피던스 선로를 도입한다. 상태추정의 방정식에 영 임피던스 선로를 사용하는 방법은 그간 몇몇 논문에서 논의된 바 있으며[8,9], 이때 영 임피던스 선로를 흐르는 전력조류는 새로운 상태벡터로 간주되어 계산에 이용된다.

영 임피던스 선로가 도입된 전력계통의 측정방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta z = [H|M] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta x_F \end{bmatrix} + e \quad (1)$$

여기서, 측정편차벡터 $\Delta z = z - h(x^0)$,
 자코비안 행렬 $H = \partial h(x^0) / \partial x$,
 $h(x)$ 는 비선형 측정함수,
 M 은 영 임피던스 선로에 대한 측정값의 비율을 나타내는 부행렬이고,
 상태벡터 $\Delta x = x - x^0$,
 Δx_F 는 영 임피던스 선로조류의 부벡터,
 e 는 측정잡음 벡터이다.

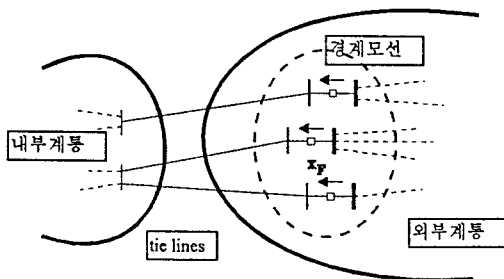


그림 1. 상호연계된 전력계통

식 (1)을 내부계통과 외부계통으로 분할하여 자세히 표현하면 다음의 식 (2)와 같이 되며, 이 식에서 I, B, E는 각각 internal, boundary, external을 의미한다.

$$\begin{bmatrix} \Delta z_I \\ \Delta z_B \\ \Delta z_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{II} & H_{IB} & H_{IE} & M_I \\ H_{BI} & H_{BB} & H_{BE} & M_B \\ H_{EI} & H_{EB} & H_{EE} & M_E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_I \\ \Delta x_B \\ \Delta x_E \\ \Delta x_F \end{bmatrix} + e \quad (2)$$

위의 식(2)와 같이 분할된 계통에 대한 최소 상승 추정기의 식은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{x}_I \\ \Delta \hat{x}_B \\ \Delta \hat{x}_E \\ \Delta \hat{x}_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{II} & S_{IB} & S_{IE} \\ S_{BI} & S_{BB} & S_{BE} \\ S_{EI} & S_{EB} & S_{EE} \\ S_{FI} & S_{FB} & S_{FE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta z_I \\ \Delta z_B \\ \Delta z_E \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, 감도행렬 $S = [H_{new}^T \cdot H_{new}]^{-1} \cdot H_{new}^T$,
 새로운 Jacobian $H_{new} = [H|M]$,
 $S_{FE} = \partial \Delta x_F / \partial \Delta z_E$.

위의 식(3)에서 감도를 나타내는 부행렬 $S_{FE}(j,k)$ 는 외부계통 내의 k번째 측정데이터가 추정된 tie line 전력조류 $\Delta x_F(j)$ 에 얼마나 영향을 미치는가에 대한 척도가 된다. 따라서, 주어진 계통과 측정데이터에 대해 이 감도 부행렬을 계산함으로써, 외부계통 내의 중요한 선로나 설비를 결정할 수 있다.

2.3 실험 및 결과

IEEE 118모선 계통을 외부계통과 내부계통의 두 부분으로 나누어 시뮬레이션에 사용하였다. 내부계통은 36모선을, 그리고 외부계통은 82모선을 갖도록 구분하였으며, 이에 따라 두 계통을 연결하는 tie line은 그림 2에 표시된 바와 같이 모두 8개로 결정되었다.

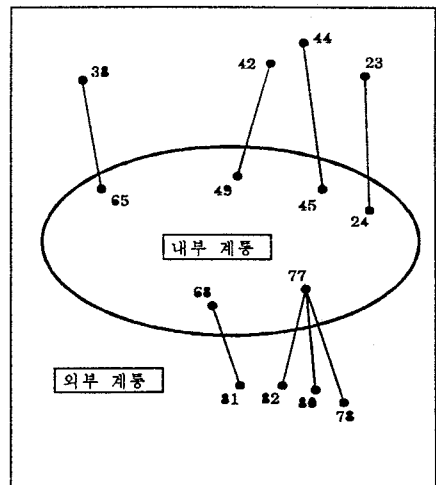


그림 2. 내부계통과 외부계통으로 분할된 IEEE 118모선 계통

시뮬레이션을 위한 목적으로 전 계통에 걸쳐서 데이터를 측정한다고 가정하였다. 즉, 계통 내 모든 선로의 양단에서 전력조류를 측정하고, 모든 모선에 주입되는 전력도 측정되는 것으로 하였다. 전력조류와 모선 주입전력, 그리고 모선전압에 대해 0.008, 0.01, 0.004의 측정 표준편차를 각각 사용하였으며, 이를 이용하여 가중치를 결정하였다.

2.3.1 외부계통 모델

외부계통 내의 주요 측정데이터를 결정하기 위해서 각 데이터들의 감도를 우선 계산하였다. 외부계통 내의 측정데이터 중에서 tie line 전력조류에 대해서 어느 기준 이상의 감도를 가지고 있는 데이터를 골라서 이들을 실시간에 전송받으려는 것이다.

기준값(threshold)을 크게 잡으면 선택되는 측정값의 수가 적어져서 계산량은 줄어 들지만 계산의 정확도는 떨어지고, 기준값을 작게 결정하면 상태추정의 결과는 정확하지만 상대적으로 계산량이 늘어나서 계산시간이 길어지고 더 많은 메모리를 필요로 하는 단점이 있다. 이러한 장단점을 고려하여 본 연구에서는 이 기준값을 0.1로 선택하였으며, 따라서 감도가 0.1보다 큰 외부계통내 측정값은 내부계통에 대해 중대한 영향을 미치는 것으로 결정되었다.

감도시험 결과 20개의 모선 주입전력과 26개의 선로 조류전력의 측정 데이터가 중요한 측정값들로 결정되었으며, 이 결과를 표 1에 요약하였다.

표 1. 외부계통 내의 주요 측정데이터

Tie-lines	선로 조류전력	모선 유입전력
23 - 24	22-23, 23-25, 23-32	23
38 - 65	38-37, 30-38	38
42 - 49	40-42, 41-42	40, 41, 42
44 - 45	43-44, 34-43	43, 44
78 - 77	78-79, 79-80	78, 79
80 - 77	78-79, 79-80, 81-80, 80-96, 82-96, 94-96, 80-97, 80-98, 80-99, 95-96, 96-97, 98-100, 99-100, 100-103	79, 80, 95, 96, 97, 98, 99, 100
81 - 68	81-80	81
82 - 77	82-83, 83-84, 83-85, 80-96, 82-96, 94-96, 95-96, 96-97	82, 83, 84, 96
Total	26	20

2.3.2 상태추정

감도계산에 의해 결정된 외부계통 내의 주요 측정데이터를 이용하여 상태추정을 수행하였다. 내부계통의 데이터와 외부계통의 주요 측정데이터는 부하의 변화에 따라 실시간 전송되어 상태추정에 사용되며, 나머지 외부계통 데이터는 설계 기준값에 고정되어 계산에 이용되는 것으로 가정하였다.

시뮬레이션의 정확도를 판별하기 위해서 다양한

부하상태를 고려하였으며, 그 중에서 50%의 경부하 경우와 150%의 과부하 상태에서의 상태추정 결과를 표 2와 표 3에 요약하였다. 감도계산에 의해 결정된 외부계통 모델과 그를 이용한 상태추정이 타당한 것인지를 확인하기 위해서 실제계통의 모선전압들을 계산하여 비교하였다.

표 2와 3에 나타나 있는 모선들이 내부계통에 속해 있는 모선들이며, 실제 계통의 운용시 내부계통 운용자의 입장에서는 내부계통의 현재 상태만이 관심의 대상이므로 외부계통의 모선들에 대한 결과는 생략하였다. 결과에서 볼 수 있는 것처럼 상태추정의 결과가 실제 모선의 정확한 전압과 큰 차이가 없으므로, 본 연구에서 제안한 감도계산에 의한 외부계통 모델과 이를 이용한 상태추정이 실제 계통에 적용되어 사용가능함을 알 수 있다.

표 2. 경부하시 실제 모선전압과 상태추정 결과

모 선 번호	실제 모선전압	상태추정 결과		
	V(p.u.)	θ (deg.)	V(p.u.)	θ (deg.)
24	0.9920	-3.51	0.9816	-2.85
45	1.0128	-6.68	1.0046	-6.75
46	1.0050	-5.07	0.9966	-5.14
47	1.0205	-4.16	1.0121	-4.24
48	1.0245	-4.56	1.0160	-4.65
49	1.0250	-4.03	1.0165	-4.11
50	1.0065	-4.96	0.9981	-5.07
51	0.9809	-6.13	0.9726	-6.26
52	0.9736	-6.55	0.9653	-6.69
53	0.9594	-6.92	0.9510	-7.06
54	0.9550	-6.37	0.9464	-6.51
55	0.9553	-6.55	0.9467	-6.68
56	0.9570	-6.46	0.9484	-6.59
57	0.9772	-6.03	0.9687	-6.16
58	0.9700	-6.42	0.9617	-6.56
59	0.9850	-4.69	0.9764	-4.80
60	0.9943	-2.89	0.9860	-2.96
61	0.9950	-2.45	0.9867	-2.52
62	0.9982	-2.75	0.9899	-2.82
63	0.9715	-3.07	0.9633	-3.15
64	0.9855	-2.25	0.9774	-2.32
65	1.0050	-0.84	0.9968	-0.89
66	1.0500	-0.92	1.0415	-0.96
67	1.0239	-2.16	1.0156	-2.22
68	1.0031	-0.98	0.9951	-1.03
69	1.0350	0.00	1.0262	0.00
70	0.9985	-3.20	0.9895	-3.15
71	0.9942	-3.29	0.9852	-3.22
72	0.9800	-3.56	0.9700	-3.21
73	0.9910	-3.34	0.9820	-3.28
74	0.9948	-3.77	0.9859	-3.80
75	1.0001	-3.19	0.9912	-3.22
76	0.9847	-3.57	0.9758	-3.63
77	1.0220	-1.27	1.0132	-1.28
116	1.0050	-1.21	0.9970	-1.25
118	0.9900	-3.58	0.9811	-3.63

3. 결 론

본 논문에서 사용한 감도해석 프로그램은 외부 전력계통 내의 주요 측정값들을 결정할 수 있다. 이 프로그램에 의해 결정된 주요 측정데이터들은

전력회사 간의 협의나 계약에 따라 실시간으로 상호교환되어야 하며, 이러한 데이터의 상호교환이 원활히 이루어지지 않을 경우 내부계통의 상태추정의 정확도가 저하될 수도 있다.

감도해석에 사용된 기준값(threshold)은 특정 전력회사에서 필요로 하는 상태추정의 정확도나 컴퓨터의 계산속도, 메모리 용량등에 따라 프로그램 내에서 변화시킬 수 있다. 물론, 외부계통에서 실시간으로 전송받을 수 있는 측정데이터의 수에 따라 이를 변화시켜야 하는 경우가 생길 수도 있다.

표 3. 과부하시 실제 모선전압과 상태추정 결과

모 선 번 호	실제 모선전압		상태추정 결과	
	V(p.u.)	θ (deg.)	V(p.u.)	θ (deg.)
24	0.9920	-16.27	1.0036	-17.41
45	0.9585	-23.26	0.9719	-22.70
46	1.0050	-19.07	1.0165	-18.60
47	1.0115	-15.33	1.0224	-14.94
48	1.0164	-16.64	1.0272	-16.21
49	1.0247	-15.15	1.0355	-14.73
50	0.9947	-18.35	1.0051	-17.88
51	0.9512	-22.51	0.9612	-21.98
52	0.9383	-24.03	0.9482	-23.48
53	0.9316	-25.67	0.9414	-25.10
54	0.9550	-24.38	0.9650	-23.83
55	0.9500	-24.79	0.9600	-24.23
56	0.9519	-24.49	0.9619	-23.95
57	0.9636	-22.45	0.9736	-21.93
58	0.9474	-23.80	0.9572	-23.26
59	0.9580	-17.72	0.9949	-17.33
60	0.9917	-11.84	1.0013	-11.56
61	0.9950	-10.48	1.0045	-10.24
62	0.9970	-11.41	1.0065	-11.14
63	0.9647	-12.47	0.9742	-12.19
64	0.9810	-9.69	0.9904	-9.45
65	1.0050	-4.71	1.0146	-4.55
66	1.0500	-5.06	1.0602	-4.89
67	1.0146	-9.14	1.0242	-8.90
68	1.0033	-4.55	1.0126	-4.41
69	1.0350	0.00	1.0451	0.00
70	0.9707	-12.40	0.9801	-12.43
71	0.9800	-13.23	0.9892	-13.31
72	0.9800	-15.69	0.9903	-16.31
73	0.9910	-13.61	1.0000	-13.66
74	0.9276	-13.84	0.9374	-13.68
75	0.9370	-11.72	0.9469	-11.58
76	0.9053	-13.82	0.9154	-13.59
77	0.9946	-5.97	1.0050	-5.84
116	1.0050	-5.20	1.0143	-5.05
118	0.9117	-13.44	0.9217	-13.24

본 연구에서 개발된 프로그램은 내부계통과 외부계통에서 공히 표준 측정데이터와 계통계수(system parameter)를 사용함으로써 프로그램 사용자가 외부계통의 일부분 또는 전체에 속해 있는 선로나 모선의 감도를 측정하는데에도 확장 사용할 수 있다.

또한, 프로그램에 사용된 이론과 공식은 상태추정 기법에 기초하였기 때문에, 외부계통의 토폴로지가 변화한 경우뿐만 아니라 데이터 측정 위치가 변화한 경우에도 전력회사가 쉽게 외부계통 모델을 개선할 수 있는 장점이 있다. 프로그램에서 얻어지

는 감도는 계통의 토폴로지와 측정데이터 위치의 함수이므로 주어진 시점에서 이용가능한 측정데이터에 기초하여 수시로 변화할 수 있게 되는 것이다.

본 논문에서 제안한 감도해석 방법은 차후 더욱 정확한 외부 전력계통의 개발에 기초가 될 수 있을 것이며, 외부 전력계통 내의 토폴로지 에러를 판별하는 등의 연구에 그 기틀을 제공하는 의미가 있다. 향후, 이러한 외부계통을 포함한 상태추정이나 토폴로지 문제들이 완벽하게 고려된 계통 운용이 실현되면 현대의 대형화된 전력계통의 운용을 더욱 효과적이고 안전하게 할 수 있을 것이다.

(참 고 문 헌)

[1] 서 주석, "한국의 전력정책 방안," 전기학회지 44권 11호, pp. 3-8, 1995.
 [2] S. Deckmann, A. Pizzolante, A. Monticelli, B. Stott and O. Alsac, "Studies on Power System Load Flow Equivalencing," IEEE Trans. on Power Appar. and Syst., Vol. PAS-99, No. 6, pp. 2301-2310, 1980.
 [3] F.F. Wu and A. Monticelli, "Critical Review of External Network Modeling for Online Security Analysis," Electrical Power and Energy Systems, Vol. 5, No. 4, pp. 222-235, 1983.
 [4] A. Bose and K.A. Clements, "Real-Time Modeling of Power Networks," Proc. of the IEEE, Vol. 75, No. 12, pp. 1607-1622, 1987.
 [5] A. Bose, "Modeling of External Networks for On-Line Security Analysis," IEEE Trans. on Power Appar. and Syst., Vol. PAS-103, No. 8, pp. 2117-2125, 1984.
 [6] I. Dabbaghchi and L.S. VanSlyck, "Inter-Utility Data Exchange for State Estimation," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No. 3, pp. 1254-1262, 1988.
 [7] K. Kato, I. Dabbaghchi, J.J. Allemong, J.K. Robinson, J. Singh and R. Smith, "Real-Time Data Exchange for On-Line Security Assessment," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 3, pp. 1322-1332, 1992.
 [8] A. Monticelli and A. Garcia, "Modeling Zero Impedance Branches in Power System State Estimation," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, No. 4, pp. 1561-1570, 1991.
 [9] A. Monticelli, "Modeling Circuit Breakers in Weighted Least Squares State Estimation," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 3, pp. 1143-1149, 1993.